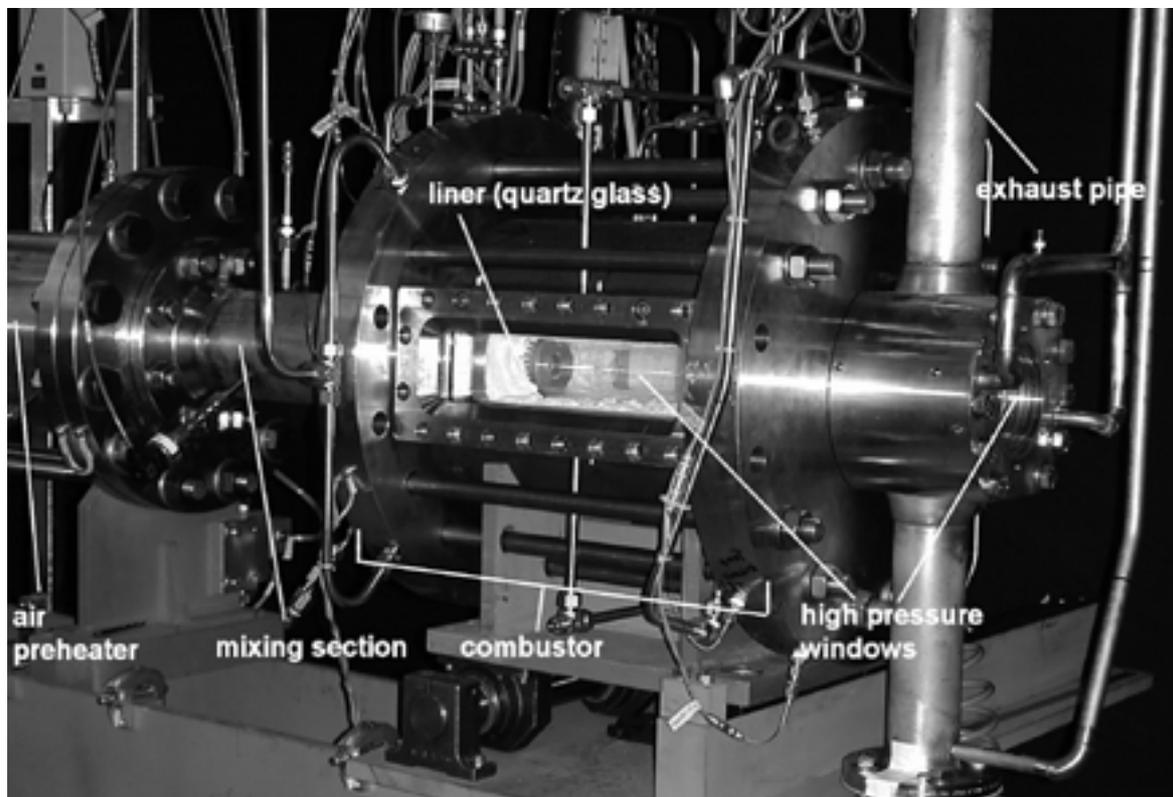


FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Hochdruck-Verbrennungsprüfstand am Paul Scherrer Institut (Bildquelle: P. Griebel, PSI, 2002)

Das Quarzglas in der Bildmitte erlaubt im Projekt **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** laser-optische Messungen am Prüfstand. Ideale Voraussetzungen zur Validierung der numerischen Modellierung von Verbrennungsprozessen unter hohem Druck

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor decken fossile Energieträger einen Grossteil des Schweizer Energiebedarfs. Zwecks Entschärfung der CO₂-, der Emissionsproblematik und der Ressourcenschonung sowohl fossiler als auch nachhaltig erzeugter Brennstoffe liegt die Bedeutung des Programms Verbrennung daher klar auf der Linie der **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz und der Reduktion von Emissionen technischer Verbrennungssysteme** [27].

Um diese ingenieurmässige Gratwanderung zu ermöglichen, müssen die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien erarbeitet, verstanden und anschliessend in käuflichen Produkten umgesetzt werden. Das Programm trägt zu dieser anspruchsvollen Aufgabe bei, indem es Mittel bereitstellt, damit die international konkurrenzfähigsten Forscher stets an vorderster Front mithalten können. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation, Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz und die Schadstoffanalytik** hat sich – ebenso wie die Kontinuität der Förderung – bewährt. Die Projekte in diesen Schwerpunkten haben meist generischen Charakter und das erarbeitete Fachwissen ist daher bei allen Verbrennungstechnologien einsetzbar. Dank diesem Know How ist sowohl in den BFE geförderten P+D-Projekten als auch in den KTI-Projekten eine effiziente Zusammenarbeit zwischen Hochschul-, Fachhochschul- und Industriepartnern im In- und Ausland gewährleistet.

Bei der Umsetzung liegen die Schwerpunkte in der Motoren- und Gasturbinentechnologie:

- In der **motorischen Verbrennung** wird eng mit Motorenherstellern sowohl in der Schweiz (*Liebherr Machines SA, Iveco und Wärtsilä NSD*) als auch im Ausland (*GM, VW, Opel, Renault, ALV Graz, Iveco Turin, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. in Deutschland* [36, 37]) an der Umsetzung neuer Verbrennungstechnologien zusammen-

gearbeitet. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche (*Kistler, Common Rail Technologies, Bosch, u.a.*).

- Verstärkt wurde im Berichtsjahr die ständig geförderte Zusammenarbeit mit der Firma *Alstom Power* in der **Gasturbinentechnologie**. Behandelt werden grundsätzlichen Fragen der heutigen und der nächsten Generationen von Turbinen. Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem PSI und der ETH Zürich.

Diese generellen Ziele gemäss dem Mehrjahresprogramm **Feuerung und Verbrennung** [53] beinhalten die:

- Sicherstellung der Qualität und Kontinuität in Forschung und Entwicklung.
- Ausbildung von Studenten und Doktoranden auf dem Gebiet neuer, schadstoffarmer und energieeffizienter Verbrennungstechnologien.
- Verstärkte Umsetzung der Forschungsergebnisse mit neuen und bestehenden Industriepartnern.
- Erarbeitung eines Strategiepapiers zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung durch das BFE und Verabschiedung desselben durch die BFE-Geschäftsleitung.
- Fortsetzung der im Jahr 2001 gestarteten Vernetzung der Fachhochschulen in Sachen Verbrennungsforschung untereinander sowie mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI).
- Vernetzung dieses Fachwissens mit Industriepartnern und dessen Umsetzung zusammen mit Partnern aus der Motoren-, Brenner- und Gasturbinenbranche in marktfähige Produkte.

Das im Programm **Feuerung und Verbrennung** [53] geförderte Fachwissen ist an der ETH-Zürich im Laboratorium für Verbrennungstechnik und Verbrennungsmotoren (LVV), und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT) sowie am PSI und an der EMPA konzentriert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

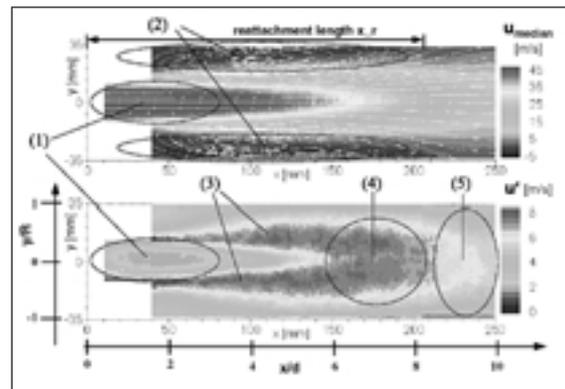
Ziel des Projekts **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern** [1] war, das Werkzeug der direkten numerischen

Simulation (DNS) zum vertieften Verständnis von generischen Fällen der Wechselwirkung zwischen Turbulenz und chemischer Kinetik einzusetzen und Wege aufzuzeigen, wie erste Berechnun-

gen für Flammen von technischer Bedeutung (in Anwendungen beim Industriepartner) in naher Zukunft modellfrei durchgeführt werden können. Beide Ziele sind praktisch vollständig erreicht worden. Als Beispiele für die Beschreibung von komplexen Interaktionen zwischen Strömungsparametern und laminaren Flammen sind einerseits eine detaillierte Untersuchung von gestreckten Diffusions- zu vorgemischten *edge-flames* und umgekehrt sowie andererseits instationäre Effekte (Löschen und Wiederzünden) von Diffusionsflammen am Gegenstrombrenner zu erwähnen. Beide Fälle sind wesentlich für das Verständnis und die Modellierung der turbulenten Verbrennung [49, 50]. Inzwischen ist in Zusammenarbeit mit dem *Argonne National Laboratory* eine voll parallelisierte 3-D Version für komplexe Geometrien mit *ein-Schritt*-Reaktionskinetik praktisch fertiggestellt und für erste DNS-Simulationen von Flammen bei turbulenten oder Übergangsströmungen einsetzbar.

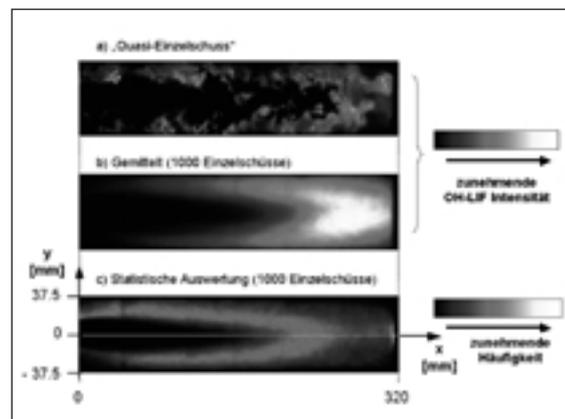
In den ersten beiden Jahren des Projekts **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** [2] stand die Durchführung zweier Vorstudien zur Flammenstabilität und zu laminaren Flammen im Vordergrund: Diese umfassten den Aufbau des Hochdruck-Verbrennungsprüfstandes (siehe Titelbild) und die Bestimmung der mittleren Flammenposition in Abhängigkeit der Betriebsgrößen Druck, Temperatur, Luftzahl und Geschwindigkeit. In enger Zusammenarbeit mit einer anderen PSI-Gruppe konnte im Berichtsjahr die Charakterisierung der Strömung mit Hilfe von *Particle Image Velocimetry* erfolgreich durchgeführt werden. Die experimentelle Bestimmung der Turbulenzintensität und des turbulenten Makrolängenmasses war wichtige Voraussetzung für die gezielte Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Position und die Struktur der Flammenfront. Anhand umfangreicher Messungen konnten die Turbulenzintensität und das Makro-Längenmass bestimmt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Strömungsfeld in fünf Bereiche unterteilt werden kann: Kernzone (1), Rezirkulationszone (2), Scherschicht (3), hochturbulente Zone (4) und Dissipationszone (5) (s. Fig.1). Durch die Wahl der Gittergeometrie und -position kann die Turbulenzintensität in der Kernzone, die sich in der Nähe des Brennkammerkopfes befindet, gezielt beeinflusst werden. Weiter stromabwärts wird die Turbulenz vor allem durch die in der Scherschicht erzeugte Turbulenz bestimmt. Die maximale Turbulenzintensität beträgt ca. 20 % der massenstromgemittelten Geschwindigkeit. Alle Ergebnisse zeigen, dass die Turbulenzintensität proportional der massen-



Figur 1: Typische Verteilung der mittleren Axialgeschwindigkeit u_{median} und der Turbulenzintensität u' , (Quelle PSI)

stromgemittelten Geschwindigkeit ist. Das turbulente Makrolängenmass am Brennkammereintritt entspricht ungefähr dem halben Bohrungsdurchmesser des Turbulenzgitters. Infolge Dissipation der kleinen Wirbel steigen die Werte für das Makrolängenmass mit zunehmender axialer Distanz zum Brennkammereintritt (x-Koordinate) an.



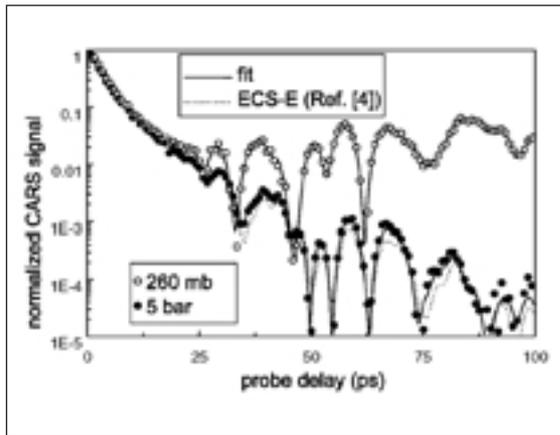
Figur 2: Resultate der OH-LIF Messungen: „Quasi-Einzelschussaufnahme“ (oben), gemittelte Aufnahme der OH-Intensität (mitte), statistische Auswertung der häufigsten Flammenposition (unten)

Die Messungen und statistische Auswertung der OH-LIF (laser-induzierte Fluoreszenz von OH-Radikalen) Aufnahmen (Fig. 2) zur Bestimmung der Position und der Struktur der Flammenfront zeigen, dass mit zunehmender Turbulenz, die Flamme kürzer und stärker gefaltet wird. Die Abnahme der Flammenlänge ist auf eine höhere turbulente Flammengeschwindigkeit zurückzuführen.

OPTISCHE MESSMETHODEN

Die PSI-Gruppe konzentriert sich im Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauer-**

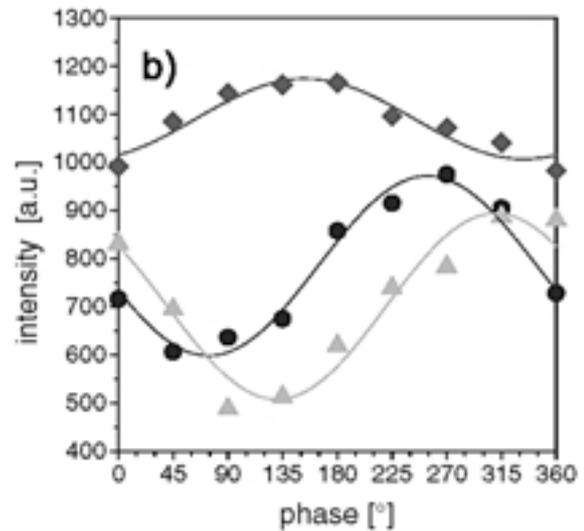
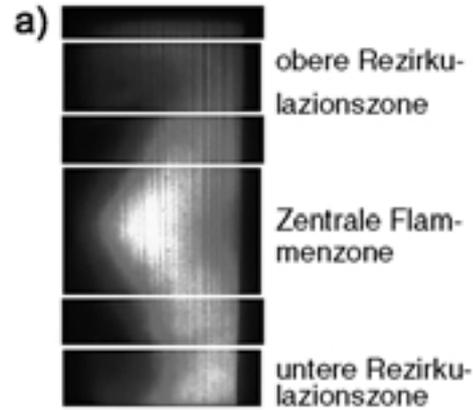
stoffhaltiger Brennstoffe [3] auf die Untersuchung von Formaldehyd, - ein wichtiges Zwischenprodukt in Flammen. Formaldehyd, H_2CO , spielt eine wesentliche Rolle für die Zündmechanismen eines brennbaren Gemisches. Zudem hängt die Erscheinung von H_2CO mit der Tendenz zur Russbildung zusammen. H_2CO tritt in Flammen sauerstoffhaltiger Brennstoffe, die eine kleinere Russneigung zeigen, in gösserer Konzentration auf als in Flammen reiner Kohlenwasserstoffe.



Figur 3: Experimentelle und gut übereinstimmende gefittete fs-CARS-Transienten in reinem Stickstoff bei Raumtemperatur und Drücken von 0.26 und 5 bar.

Mit resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden konnte das Spektrum von H_2CO untersucht werden. Die Messungen liefern Daten über den Energietransfer von Rotations- und Vibrationsanregungen im elektronischen Grundzustand von H_2CO . Auf dem Weg zur Untersuchung von Dissoziationsmechanismen mehratomiger Moleküle mit nichtlinearen femtosekunden Spektroskopien wurde die Linienbreite von Stickstoff CARS – (Kohärente Anti-Stokes Raman Spektroskopie) Übergängen bestimmt. Die zur theoretischen Beschreibung notwendigen Stossmodelle konnten so angepasst werden, dass nicht nur eigene, sondern auch Messungen anderer Gruppen mit hervorragender Genauigkeit wiedergeben werden können (Fig. 3).

Eine weitere PSI-Gruppe befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** [4] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinenbrennern wie auch bei Laborbrennern. Ziel in beiden Brennern ist die Bestimmung von Ort, Form und wenn möglich der Bewegung der Flamme, sowie von der Konzentration des Brennstoffs und anderen Komponenten.

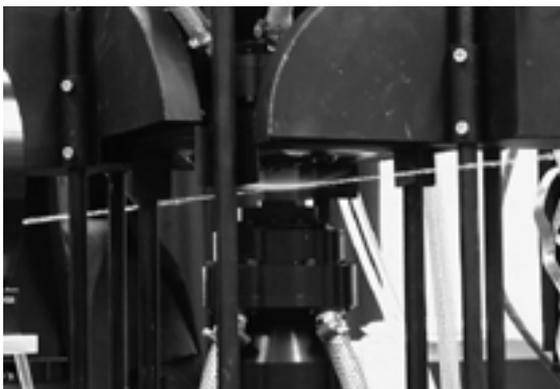


Figur 4: Räumliche Zuordnung der OH-LIF-Wirkungsquerschnitte (links); Variationen der OH LIF Intensität (rechts) in der zentralen Flammenzone (\blacklozenge), in der unteren- (\blacktriangle) und oberen (\bullet) Rezirkulationszonen, sowie deren zugehörigen sinusoidalen Fits (—) für eine Oszillationsperiode.

In einem Gasturbinenbrenner wurden zusammen mit dem Industriepartner *Alstom* thermoakustische Verbrenungsinstabilitäten mittels 2-D-LIF des Radikals OH untersucht. Die phasengemittelten Daten (bezüglich der dominierenden akustischen Schwingung) zeigen periodische Intensitäts- und Positionsschwankungen. Es wurde gezeigt, dass die periodische Bewegung der Flamme nicht allein von der akustischen Bewegung im Gas, sondern zur Hauptsache durch eine periodische Veränderung von Parametern der Verbrennung hervorgerufen wird. Ferner wurde für eine Reihe von Brennerkonfigurationen die relative Phasenlage von Schallsschwingung, Flammenbewegung und OH-LIF-Intensität (Fig. 4a) bestimmt. Mit einer Phasenverschiebung (Fig. 4b) von etwa 30-50° folgt das Maximum der LIF-Intensität dem Maximum der Flammengeschwindigkeit gegenü-

ber dem strömenden Gas. Ziel bei den Labor-Gegenstrombrennern ist die Bestimmung der Flammenformen. Zudem sollen die Konzentrationen ausgewählter Gaskomponenten in solchen Brennern bestimmt werden. Die gemessenen Grössen werden mit Resultaten von DNS-Rechnungen verglichen. Im Berichtsjahr wurde ein verbesserter Gegenstrombrenner mit regelbarer Versorgung für die Luft- und Brennstoffzufuhr aufgebaut. In einem ersten Schritt wurden die Stabilitätszonen für Diffusions- und sogenannte Edge-Flamen bei der Verbrennung von Methan mit Luft bestimmt.

In den Projekten **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** [5] und **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [6] wurden Messungen des Strömungsprofils am turbulenten Gegenstrombrenner (Fig. 5) durchgeführt. Dieses ist im Rahmen der experimentellen Unsicherheit radialsymmetrisch und reproduzierbar, so dass die Randbedingungen für nachfolgende numerische Arbeiten gut bekannt sind. Am selben Brenner wurden mittels Raman-Spektroskopie Temperaturen und Konzentrationen der Hauptspezies vorerst im laminaren Betrieb durchgeführt. Die Existenz der Doppelflammenstruktur bei teilvorgemischten Flammen im fetten Bereich wurde bestätigt und wurde bei höheren Äquivalenzverhältnissen beobachtet als dies der GRI-Mechanismus für Methanverbrennung vorhersagt. Die LDA-Messungen von Stroomer am kalten Ringbrenner zeigten interessanterweise, dass trotz symmetrischen Randbedingungen das Strömungsfeld hinter der Stauscheibe unter speziellen Bedingungen starke Asymmetrien aufweisen kann.



Figur 5: LDA-Laserstrahl misst das Strömungsprofil am Düsenaustritt des Gegenstrombrenners

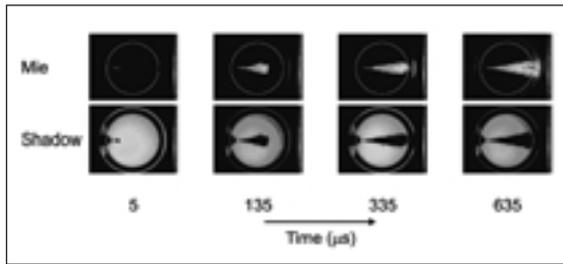
Das Projekt **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** [7] liefert Beiträge zur Modellierung von nicht vorgemischter und teilvorgemischter turbulenter Verbrennung. Die beiden Modelle für nicht vorgemischte Verbrennung, die Wahrscheinlichkeit-Dichtefunktion (PDF) der Transport-Glei-

chungsmodelle und das Laminar-Flamelet-Modell wurden kombiniert. Das neue TLFM/PDF-Modell zielt darauf ab, die Vorteile der beiden Modelle zu kombinieren und gleichzeitig ihre Nachteile zu vermeiden. Der gewählte Kompromiss soll den Mischungsbruch (skalare Erhaltungsgrösse) mit der PDF-Transportgleichung lösen und die Anwendung von PDF's mit vorgegebener Form, wie dies bei den klassischen Flamelet-Modellen der Fall ist, vermeiden. Die skalare Dissipation bestimmt Zustände von lokalem Verlöschen und die Reaktionsfortschrittsvariable definiert die Bedingungen der Teilvormischung. Die Studien wurden basierend auf Freistrahlfammen (mit Pilotflamme) durchgeführt und waren Arbeitsunterlage eines internationalen Workshops. Die Geschwindigkeit, der Mischungsbruch, die Temperatur und der Massenbruch der Spezies werden berechnet und zeigen eine bessere Übereinstimmung mit dem Experiment. Mit einer Dissertation [38] wurde dieses Projekt im Berichtsjahr abgeschlossen.

Im interdisziplinären Verbundprojekt der drei ETH-Zürich Institute SAM, LAV und LTNT **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** [8] entwickelt das SAM eine neuartige, multidimensionale Lagrange-Transportmethode höherer Ordnung. Die neue Methode basiert auf der Beschreibung von Fluidelementen als *Lagrange-Finite* Volumen, welche transportiert und deformiert werden. Im LTNT wurden LES-Berechnungen an einer kalten *Bluff Body*-Strömung durchgeführt und die Resultate mit denjenigen einer bestehenden U-RANS-Berechnung verglichen. Die Modellierung der skalaren Dissipation erwies sich als Schlüsselgrösse und bietet eine ganze Reihe von Möglichkeiten an, die in der nächsten Projektphase ausgetestet werden. Das LAV schlägt Lösungen vor, um den Anstieg der räumlichen Auflösung von LES mit zunehmender Reynolds-Zahl zu reduzieren. Eine Modell-Modifikation (*Intermittency Correction*) wurde für inkompressible Kanalströmungen getestet. Die Resultate zeigen deutlich das Potenzial einer solchen Modifikation in Bezug auf die Reduktion der räumlichen Auflösung und daraus resultierend der Rechenzeiten.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Für die Untersuchung der Verbrennungsmechanismen in einem Diesel-Motorzyklus steht am PSI ein in Zusammenarbeit mit dem ETH-Labor für Verbrennungsmotoren aufgebauter Prüfstand zur Verfügung, mit dem Sprayflammen vom Beginn der Einspritzung bis zum Ausbilden einer stabilen Flamme untersucht werden können. Im Gegensatz zu einem Diesel-Motor bleibt das Volumen, in dem sich die Flamme entwickelt, bei den PSI-

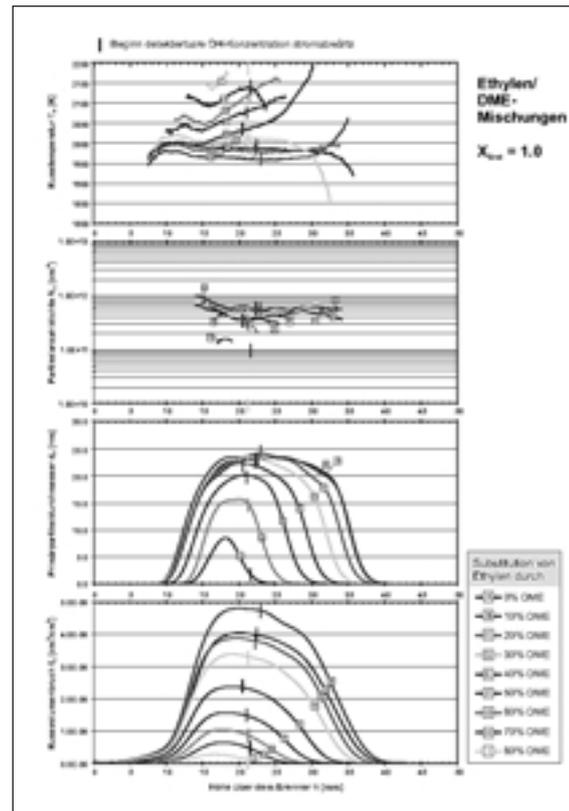


Figur 6: Typische Sequenz von gemessenen Streubildern (obere Zeile) und Schattenbildern (untere Zeile) für Dieselfuel Sprays bei 720 K ($P_{inj}=1000$ bar, $P_{cell}=40$ bar).

Versuchen konstant (keine Kolbenbewegung). Realitätsnahe Messungen sind deshalb nur für eine kurze Zeit nach Einspritzbeginn möglich. Versuche an diesem Prüfstand bieten aber gegenüber Experimenten mit optisch zugänglich gemachten Motoren den Vorteil, dass in dieser kritischen Phase störungsfrei gemessen werden kann als in einem Experimentiermotor, bei dem der optische Zugang geometrisch stark eingeschränkt ist, und die Fenster durch die notwendigen Schmiermittel nach wenigen Zyklen degradiert werden. Im Projekt *Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell* [9] wurde die Ausbreitung von Diesel-Sprays bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vermessen (Fig. 6) und mit Modellen verglichen. Die Messmethoden zur Erfassung der Russbildung wurden in Experimenten mit einem Wolfhard-Parker Brenner entwickelt. Zeitlich aufgelöste *Laser induzierte Inkandescenz* (LII) und Messungen des elastisch gestreuten Lichtes liefern den Russvolumenbruch, die Russ-Teilchenanzahl und -Teilchengröße [39, 40].

In Zusammenarbeit mit der Gruppe Reaktionsanalyse des PSI [9] wurden auf Ende 2002 zwei Dissertationen [41, 42] im Projekt *Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasen-Strömungen* [10] beendet. Im Teil *Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russbildung in einer Diffusionsflamme* [41] wurden mittels verschiedener laseroptischer Messtechniken die Russparameter Russvolumenbruch (f_v), Primärpartikeldurchmesser (d_p) und Russtemperatur (T_R) in laminaren Diffusionsflammen für verschiedene Zumischungen der Testbrennstoffe Dimethylether (DME, sauerstoffhaltig) und Ethan (parafinisch) zum Basisbrennstoff Ethylen (olefinisch) bestimmt (Fig. 7). Die experimentellen Ergebnisse zeigen für beide Versuchsbrennstoffe eine Reduktion des Russes in der Flamme, wobei DME die Russbildung wesentlich wirksamer unterdrückt und die Russoxidation fördert. Erklärungsansätze

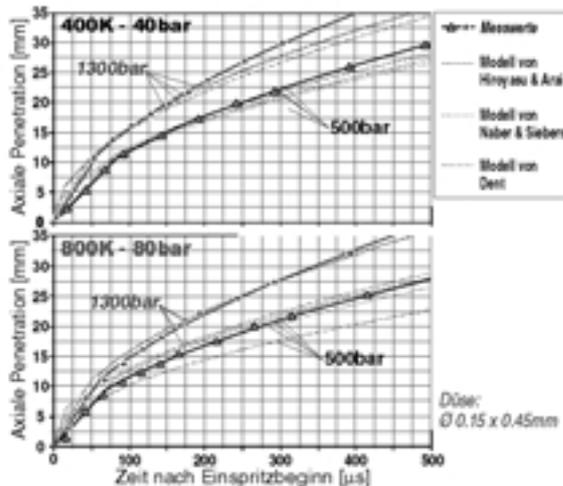
können durch die numerische Simulation der jeweiligen Reinstoffflammen geliefert werden. Gleichgewichtsberechnungen ergeben eine Erhöhung des Wassergehaltes in der Flamme, was eine Russminderung verursachen kann. Die experimentellen Resultate liegen in einer umfangreichen Datensammlung vor, welche zur Validierung und Verbesserung zukünftiger numerischer Russmodelle herangezogen wird.



Figur 7: Russparameter entlang der Flammenachse für Ethylen/DME Mischungen

Im Teil *Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck* [42] wurde die zeitabhängige Ausbreitung des Einspritzstrahls mit der Schattenbildtechnik erfasst. Als Versuchsträger diente die Hochtemperatur- und Hochdruckzelle des LAV. Der Einsatz der Konstantvolumenzelle erlaubte eine sehr grosse Variation der Umgebungsbedingungen für die Experimente, wodurch neue Erkenntnisse über das Einspritzstrahlverhalten unter hohem Gasdruck resp. bei hohen Gas Temperaturen gewonnen werden konnten. Die lokalen Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten wurden mittels Phasen-Doppler-Anemometrie bestimmt. Sie geben Auskunft über die Qualität des Strahlauflaufs resp. der weiteren, sekundären Atomisierung. Die Auswirkung der

Gastemperatur auf die mittleren Tropfengrößen ist sehr gross, hingegen zeigt eine Variation der Gasdichte keinen Einfluss auf die entstehenden Tropfengrößen.



Figur 8: Gemessene und theoretische Penetrationsverläufe $S(t)$, Düsenspitze $\varnothing 0.15 \times 0.45\text{mm}$, Gaszustand: 400°K , 40bar , respektive 800°K , 80bar .

Die ermittelten Sprayparameter sind hochwertige Basisdaten respektive Referenzdaten für die numerische Simulation der Sprayausbildung. Die Parameterauswahl ist äusserst weit gefasst, was für die erforderliche Validierung von grossem Wert ist.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische von hoher Wichtigkeit. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [11] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die in flüssigem Zustand in den Brennraum eingespritzt werden, modellmässig und experimentell untersucht. Zur Berechnung der physikalischen Prozesse vom flüssigen Zustand bis zur verdampften Phase müssen sowohl die Prozesse selber wie auch die Wechselwirkungen zwischen den zwei Phasen modelliert werden. Die durchgeführten Berechnungen wurden mit laboreigenen Messungen an einer optisch zugänglichen Hochtemperaturdruckzelle validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Güte der Berechnungen von der verwendeten numerischen Auflösung (diese

ist abhängig von den charakteristischen Zeit- wie auch Längenmassen der Einspritzung) abhängen. Eine mit dem Experiment übereinstimmende Berechnung des Brennverlaufes ist die grosse Herausforderung in der 3-D-CRFD-Simulation. Das im Projekt verwendete Verbrennungsmodell basiert auf einem charakteristischen Zeitmass. Bei Simulationen im Teillastbereich hat sich herausgestellt, dass der Verbrennungsmodell-Parameter, der ursprünglich für die ottomotorische Vormischverbrennung vorgeschlagen wurde, auch für die dieselmotorischen Vormischverbrennung entscheidend ist.

Die Entwicklung neuer, energieeffizienter und schadstoffarmer dieselmotorischer Brennverfahren soll aufbauend auf den kürzlich am LAV abgeschlossenen Arbeiten in zwei Ende 2002 neu gestarteten Projekten weiter vorangetrieben werden. Die Resultate werden nicht nur für die Entwicklung neuer Brennverfahren von Bedeutung sein, sondern auch für diejenige neuer Injektoren und Einspritzsysteme und sind somit auch für die auf diesem Gebiet sehr starke Schweizer Zulieferindustrie für die Automobilbranche von strategischem Interesse. Da die optimale Energieeffizienz sowie die Bildung von NO_x und Russpartikeln in direktem Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung und der Gemischzusammensetzung abhängt, wird im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [12] das Verhalten der transienten Einspritzstrahlen (Strahlausbreitung, Tröpfchenspektren und -Verdampfung) genauer untersucht. Im Projekt **Dirkete numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [13] soll durch die Weiterentwicklung zuverlässiger und genauer Simulationswerkzeuge die Optimierung von Verbrennungssystemen hinsichtlich des Zielkonflikts Energieeffizienz (CO_2 -Reduktion) und Schadstoffemissionen vorangetrieben werden. Der Rechenaufwand für technische, turbulente Flammen ist aber beträchtlich; ein PC-Linux-Cluster am LAV/ETHZ soll zusammen mit dem LAV 3-D DNS-Code erste modellfreie Simulationen einer turbulenten Flamme ermöglichen. Aus den DNS-Daten sollen robuste Modelle der turbulenten Verbrennung für noch höhere Reynolds-Zahlen, wie sie in technischen Verbrennungssystemen vorkommen, abgeleitet werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die folgenden vier umsetzungsnahen KTI-Projekte sind voll in das laufende BFE-Programm integriert, profitieren von den BFE-Vorleistungen und ergänzen die BFE-P+D-Projekte. Im Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen** [28, 43] sind die für Ende 2002 vorgesehenen Meilensteine – Katalysatorscreening und Berechnungsmodell – zielgerecht erreicht worden. Die Erkenntnisse aus dem neu bewilligten Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [29] sollen in die Verbesserung der laufenden Generation von Alstom-Gasturbinen einfließen. Im neuen Projekt **Grundlagen der H₂-Reformat-Zumischung am Ottomotor** [30] erarbeiten die HTA Biel, das LAV und der Industriepartner Robert Bosch GmbH Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich des Ottomotors. Ziel der Partner LAV und Kistler AG im neuen Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [31] ist die Realisierung einer Lichtwellenleiter-Sondenspitze mit welcher im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst gemessen werden kann. Damit können neue Einspritz- und Verbrennungsstrategien auch umgesetzt und letzten Endes in der nächsten Motorengeneration strengere Emissionsgrenzwerte erfüllt werden.

Im November 2002 lud das **Automotive Competence Network ACN-CH** mit Unterstützung der KTI zum *Automotive Day 2002* an der HTA Biel ein. Referenten aus der Automobil-Wirtschaft

und der (Fach-)Hochschulen informierten über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse.

Das im April 2002 an der EMPA Akademie in Dübendorf durchgeführte 11. Internationale Automobiltechnische Symposium war dem Thema **Verbrennungsmotoren – F&E-Aktivitäten Schweiz** gewidmet.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente die Tagung des Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV) vom Oktober 2002, die unter dem Motto **Verbrennungsforschung an Fachhochschulen** an der Fachhochschule Yverdon abgehalten wurde. Das Angebot des BFE anlässlich der SVV Tagung 2001, sich vermehrt für Verlängerungen von Diplomarbeiten zu engagieren, wurde von der SHR in Rapperswil, der HTA Luzern [48] und Hes-SO in Freiburg genutzt und die entsprechenden Arbeiten in Yverdon vorgestellt.

Per Ende Berichtsjahr hat der SVV seine Kündigung als Schweizer Nationalkomitee bei der **International Flame Research Foundation** (IFRF) eingereicht. Daher bestand auch kein Grund mehr, den SVV als ein im Handelsregister eingetragener Verein weiterzuführen. Der SVV hatte daher anlässlich der Generalversammlung vom Oktober 2002 seine Auflösung als Verein beschlossen. Unter demselben Kürzel SVV bleibt aber weiterhin eine unstrukturierte Schweizer Vereinigung für Verbrennungsforschung bestehen, zu der ein freier Zugang ohne Formalitäten möglich ist. Die Koordination der SVV-Aktivitäten liegt neu beim LAV.

Internationale Zusammenarbeit

Am PSI wurde im März 2002 die jährlich stattfindende *European Conference on Nonlinear Optical Spectroscopy ECONOS 2002* mit 19 internationalen Referenten und rund 100 Teilnehmern erfolgreich durchgeführt.

Das *Joint Annual Meeting* der *European Research Community on Flow Turbulence and Combustion* (ERCOFTAC, www.ercoftac.org) und des Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation wurde im Mai 2002 an der ETH Zürich durchgeführt.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des **IEA-Implementing Agreements Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** findet praktisch nur bilateral auf Eigeninitiative statt. Trotzdem bietet das jährliche *Task Leaders Meeting* dieses Implementing Agreements, das im Juni 2002 in Trondheim durchgeführt wurde [51], unseren Forschern die Gelegenheit, ihre bestehenden Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit Japan weiter zu pflegen und auszubauen.

Äusserst erfolgreich verlief die seit 1997 jährlich an der ETH-Zürich abgehaltene Nanopartikelkonferenz im August 2002, die vom BFE unterstützt wurde. Die Organisation teilten sich das LAV und die FH Aargau unter der Leitung von A. Mayer (TTM Niederrohrdorf). Etwa 250 Teilnehmer aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen an der Konferenz teil, um ihre Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus dieselmotorischer Verbrennung auszutauschen. Die CD-Rom [52] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen wurde vom BUWAL finanziert.

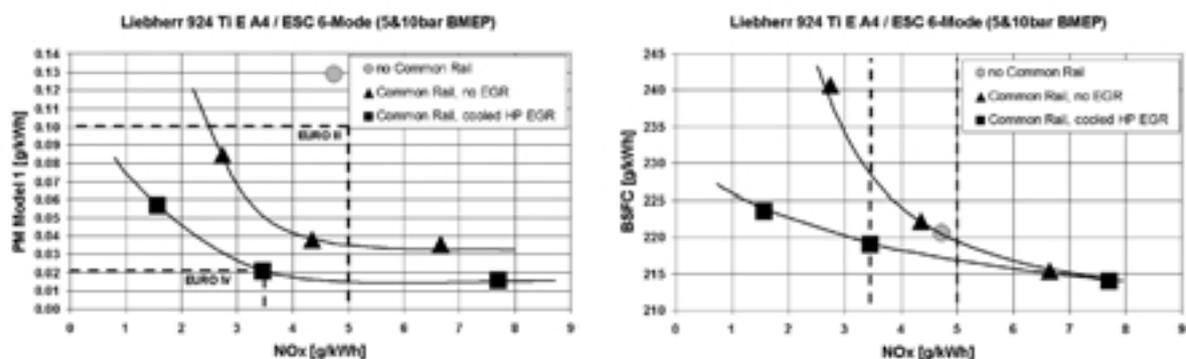
Im Jahr 2002 wurden innerhalb des 5. Rahmenprogramms der EU vier *Alstom Power*-Projekte in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich und dem PSI bearbeitet. Das PSI konstruierte im experimentellen Teil des Projekts **Advanced Zero Emission Power (AZEP) – Development of**

an Integrated Air Separation membrane-Gas Turbine [32] termingerech den Dampfgenerator und den CO₂-Supplier sowie im numerischen Teil extensive Rechnungen für zahlreiche Verbrennungskonzepte zum AZEP-Prozess. Die Rechnungen am PSI waren in guter Übereinstimmung mit den Experimenten beim Industriepartner *Alstom Power*. Damit wurde gezeigt, dass die PSI-Rechencodes sich als Konstruktionswerkzeug für AZEP-Verbrennungsprozesse eignen. Die drei weiteren EU Projekte: **TARGET: The Influence of Tar Composition and Concentration on Fouling, Emission and Efficiency of Micro and Small scale Gas Turbines** [33], **AD700-2: Development of an Advanced(700°C) Power-Palnt II** [34] und **CAME-GT: Thematic Network for Cleaner and More Efficient Gas Turbines** [35] sind nur indirekt ins Programm *Feuerung und Verbrennung* einbezogen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Nachdem im Rahmen des Vorgängerprojektes *Swiss Common Rail* am LAV bewiesen wurde, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne Abgasrückgewinnung (AGR) und Abgasnachbehandlung mittels *Hochdruck-Common-Rail*-Einspritzung erfüllt werden können, kommt die Motivation im Projekt **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** [14] aus der Herausforderung, für die *Liebherr*-Motoren noch schärfere Emissionsgrenzwerte (Niveau EURO-IV) zu erfüllen. Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen weitgehend das Potential der emissionsmindernden Massnahmen (Kombination von Hochdruckeinspritzung (*Common-Rail*) und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am

Einzyylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden. Die Umsetzung vom 1-Zylinder zu 4-Zylinder Motor unterscheidet sich in der Kombination von Abgasturbolader (Ladedruck) mit Abgasrückführungsrate. Zwei hochdruckseitige Abgasrückführungskonzepte (mit Positionierung der Abgas-Gegendruckklappe nach oder vor Turbine) wurden am Vollmotor implementiert. Gute Resultate wurden mit Abgasrückführungs-raten von über 30% bei Teillast und bis zu 10% bei mittleren Lasten erreicht. Emissionswerte unter den EURO-IV Grenzwerten für Partikel und NO_x wurden bei Teillast nachgewiesen; bei hohen Lasten wurde das Emissionsverhalten durch die Verwendung von 8-Lochdüsen mit erhöhter Austrittsfläche verbessert. Da der EURO IV Be-



Figur 9: Tradeoffs NO_x-Partikelemissionen und NO_x-Kraftstoffverbrauch, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 6 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus. Die Variationen entlang der Kurven wurden mit unterschiedlicher Einspritzstrategien und AGR-Anteile realisiert.

reich noch nicht erreicht wurde (Fig. 9), wird in den abschliessenden Messphasen versucht, mit Hochdruck-Einspritzung (*Common-Rail-System*), mit externer hochdruckseitig gekühlter Abgasrückführung, mit erhöhtem Ladedruckverhältnis und mit Diesel-Wasser-Emulsionen (bis zu 35% Wasser) die EURO IV Grenzwerte in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich zu erfüllen.

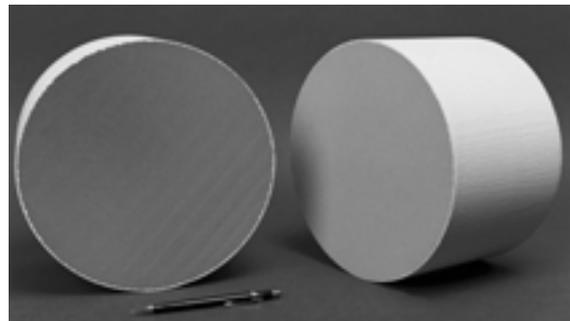
Im Berichtsjahr wurde das PSI-LAV-*Alstom*-Projekt **Homogene Gasverbrennung** [15] abgeschlossen. Das Projekt umfasste sowohl einen experimentellen Teil (ausgeführt durch PSI und *Alstom* bzw. *ABB*) als auch einen numerischen Teil (ausgeführt am LAV). Es konnte gezeigt werden, dass in geeignet modifizierten industriellen Gasturbinenbrennern – d.h. optischer Zugang mit UV-durchlässigem Quarzglas im Mischrohr (s. Fig. 10) – die Konzentration von verdampftem Heizöl mittels laser induzierter Fluoreszenz (LIF) mit einer Genauigkeit von ca. 25% gemessen werden kann. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Homogenität der im Brenner vorhandenen Gas-Luft Mischung. Die Vormischung (Verdampfung des Heizöls und die anschliessende Mischung mit der Luft) wurde mittels neu entwickelter Modelle numerisch simuliert. Im Vergleich mit einer ersten LIF-Messung wurde der in der Simulation verwendete und nicht genau bekannte Parameter SMD (mittlerer Durchmesser der Öltröpfchen) bestimmt. Die Resultate der weiteren Simulationsrechnungen ergaben eine gute Übereinstimmung mit LIF-Messungen. Die durch die Messungen validierten numerischen Modelle sind mittlerweile in die bei *Alstom* verwendeten numerischen Codes eingebaut.



Figur 10: LIF-Messungen an einem modifizierten industriellen Gasturbinenbrenner

Mit dem Schlussbericht zum Projekt **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels**

Harnstoff-SCR [16] geht am PSI eine langjährige Erfolgsgeschichte in der Entwicklung von Harnstoff-Entstickungsverfahren und neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Dieselmotoren unter der Leitung von Dr. M. Koebel in neue Hände über. Auch die Umsetzung dieser Technologien ist gewährleistet, denn nur mit der Kombination von optimierter Verbrennung und Abgas-Nachbehandlung können die für 2005 bzw. 2008 vorgesehenen Abgasnormen EURO IV und EURO V erfüllt werden. Die Zusammenarbeit mit den Firmen *Liebherr* (Bulle) und *Oberland Mangold* (Garmisch Partenkirchen) und dem Institut für Mess- und Regeltechnik (ETHZ) umfasste den Aufbau eines grossen Gesamtsystems auf einem Motorenprüfstand bei *Liebherr*. Dort wurden unterschiedliche Katalysatorenvarianten (Fig. 11) ebenso wie verschiedene Dosierstrategien für die Harnstofflösung getestet. Mit zwei Dissertationen [44, 45] wurden die Arbeiten abgeschlossen. Eine Publikation [47] wurde von der *Society of Automotive Engineers (SAE)* als eine der hervorragendsten Publikation im Jahr 2001 auf diesem Fachgebiet beurteilt. Die 221 von der *SAE* ausgewählten weltbesten technischen Literaturbeiträge des Jahres werden in den *SAE Transactions – Journal of Fuels&Lubricants* erscheinen. Ausserdem wird heute die am PSI entwickelte Katalysator-Beschichtungstechnologie in einer deutschen Firma umgesetzt.



Figur 11: Die Forschung an Katalysatoren umfasste die Optimierung der Zellzahl und Beschichtung

Nach den erfolgreichen Abschlüssen mehrerer P+D-Projekte wurden im Spätherbst 2002 folgende P+D-Projekte neu gestartet:

Im Projekt **CFD-Simulation Dreizugkessel** [17] werden die am LTNT entwickelten CFD-Programme an einem Dreistufenkessel der Firma *YGMS AG* eingesetzt mit dem Ziel, dessen exergetischen Wirkungsgrad im Brennersystem zu verbessern und gleichzeitig die Kondensation der Abgase zu vermeiden sowie die Emissionen zu reduzieren [46].

Im LAV-Projekt **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** [18] hat der Industriepartner *Liebherr* nach der Grundausslegung der V4-Zylinderköpfe für die neue Motorengeneration auch deren Konstruktion fertiggestellt. Erste Dauerlaufversuche am Prüfstand in Bulle zeigen ermutigende Ergebnisse im Hinblick auf die mechanische und thermische Belastbarkeit der Brennraumkomponenten, insbesondere der neuen Kolben. Zur Zeit wird der Umbau des 1-Zylinder Forschungsmotors am LAV/ETHZ in Angriff genommen, wobei nebst der messtechnischen Ausrüstung für die neue Ausführung (inkl. neues Einspritzsystem) vor allem die Änderung der Kurbelwelle wegen der nötigen Fremdvergabe des Umbaus einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Am LAV laufen zur Zeit umfangreiche Optimierungsarbeiten für das neue Brennverfahrenssystem, bei denen die Entwicklung der entsprechenden statistischen Werkzeuge für die Versuchsplanung in Angriff genommen wird. Parallel dazu wird mit der Zusammenarbeit ETHZ/EMPA betreffend die Russuntersuchungen durch Entnahmesonden angefangen.

Ziel des LAV-Projekts **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [19] ist die Darstellung eines neuen PKW-Antriebs, der bei vollem Potential zur Erfüllung von Nullemissionsstandards (bezogen auf CO, UHC, NO_x, Russ), eine spezifische CO₂-Reduktion um 25 % gegenüber dem heutigen Stand der Technik aufweist. Es wird dabei von herkömmlichen Treibstoffen wie Benzin, Erdgas und Diesel (bei letzterem ist die Null-

emissionstauglichkeit jedoch noch nicht gegeben) ausgegangen, womit Infrastrukturprobleme betreffend Kraftstoffversorgung ausgeschlossen werden können.

Das LTNT-Projekt: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [20] und das PSI-Projekt **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen** [21] sollen wichtige Beiträge zur weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern und die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen beim Industriepartner *Alstom* einfließen.

Im PSI-Projekt **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application** [22] wird den Anforderungen der Entwicklungstrends nach noch geringere Emissionen (NO_x < 10ppm) und höheren Wirkungsgraden ($\eta > 60\%$) – nachgegangen. Es wird nach neuen Brennverfahren geforscht, da die konventionelle Vormisch-Verbrennungstechnik den Forderungen nach noch geringerer Emissionen mittelfristig nicht mehr gerecht werden kann. Vielversprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, da sie auf grundsätzlich anderen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Für den mageren Betrieb (Luft-Überschuss) sind am PSI schon zahlreiche Entwicklungsprojekte durchgeführt worden (auch beim Industriepartner *Alstom Power*). Mit Prototypen sind schon erste Maschinen Tests in kleinen Gasturbinen durchgeführt worden, die für das *upscaling* jedoch noch einen weiteren Entwicklungsbedarf aufgezeigt haben.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die für das Berichtsjahr vorgesehenen **Ziele sind fast alle erreicht worden:**

- Die Qualität und Kontinuität in den Projekten stimmte und die Umsetzung konnte durch neue Zusammenarbeitsprojekte mit Industriepartnern weiter gesteigert werden.
- Der im Jahr 2001 begonnene Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI) zu vernetzen ist weitergeführt worden. Nach wie vor erfolgt die Vernetzung projektweise (BFE- und KTI-Projekte) [23, 24, 25, 30] und somit in kleinen Schritten. Zur Realisierung einer ganzheitlichen Vernetzung müssten mehr Impulse seitens der Fachhochschulen und der

Privatwirtschaft kommen, z. B. mit klaren Leadpositionen/ -Ansprüchen in wohldefinierten Themen (z.B. im Gasturbinentechnologiebereich).

- Aus der geplanten Entwicklung eines verbesserten Varino-Brenners zusammen mit der HTA Luzern, mit *IGNIS* und dem LTNT wurde einstweilen erst ein LTNT-*IGNIS*-Projekt definiert, das aber im Jahr 2003 gestartet wird. Die Zusammenarbeit mit der HTA Luzern ist dabei noch nicht gesichert.
- Das Strategiepapier zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung z.Hd. der BFE-Geschäftsleitung [26] wird erst Anfang 2003 zur Verfügung stehen.

- Die Darstellung des Programms Verbrennung unter www.energie-schweiz.ch musste aus Zeitgründen auf 2003 verschoben werden.

Speziell zu erwähnen sind:

- Im Berichtsjahr konnten insgesamt 11 Dissertationen [36 - 46] abgeschlossen werden. Dieser Ausbildungseffekt, unterstützt durch die BFE-Mittel, ist nicht zu vernachlässigen. Die promovierten Ingenieure bilden in der Privatwirtschaft die Vorstufe für künftige energiebewusste Kaderleute.
- Folgende Mittel der öffentlichen Hand (BFE, KTI und EU) sind im Jahr 2002 in die P+D-Schwerpunkte geflossen:
- **Gasturbinentechnologie:** 1,2 Mio CHF
- **Motorentechnologie:** 0,9 Mio CHF

Im Jahr 2003 soll:

- die Qualität und Kontinuität in Forschung und Umsetzung weiterhin durch neue ambitionierte Projekte sichergestellt werden,

- das Forschungsprogramm **Feuerung und Verbrennung 2004 – 2007** zuhanden der CORE ausgearbeitet werden. Das **Strategiepapier Verbrennungsforschung** wird dazu eine vom BFE abgesegnete Basis liefern,
- der weitere Einbezug der Fachhochschulen ins Programm gefördert und entsprechende Netzwerke definiert werden, z.B. ein gasturbinenorientiertes Netzwerk zusammen mit *Alstom Power*,
- die SVV Tagung 2003 an der FH Fribourg unter dem Motto **Schadstoffminimierung in Verbrennungssystemen** abgehalten werden,
- der Anschluss an das 6. Rahmenprogramm der EU (im Rahmen eines IP oder Netzwerks of Excellence) geschafft werden,
- das Programm *Feuerung und Verbrennung* im Internet dargestellt werden [54].

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] C. Frouzakis (frouzakis@lav.mavt.ethz.ch) et al. LAV/ETH, Zürich: **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern** (SB).
- [2] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI, Villigen: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** (JB).
- [3] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI, Villigen: **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** (JB).
- [4] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al., PSI, Villigen: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [5] P. Bajaj (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** (SB).
- [6] A. Prospero und L. Blum (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Experiment turbulente Gegenstromflamme** (JB).
- [7] L. Demiraydin und J. Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** (JB)
- [8] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH, Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB).
- [9] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell** (JB).
- [10] S. Kunte (stefan.kunte@psi.ch) et al., LAV/ETH, Zürich: **Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen** (JB).
- [11] G. Barroso und K. Boulouchos (boulouchos@lv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH, Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB).

- [12] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (ZB).
- [13] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Dirkete numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (ZB).

Liste der P+D-Projekte

- [14] R. Schubiger (rafael.schubiger@lvv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH, Zürich: **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** (JB)
- [15] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Homogene Gasverbrennung** (SB)
- [16] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI, Villigen: **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB)
- [17] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al., LTNT/ETH, Zürich: **CFD-Simulation Dreizugkessel** (JB)
- [18] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** (JB).
- [19] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [20] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al., LTNT/ETH, Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner.**
- [21] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI, Villigen: **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen**
- [22] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application.**
- [23] M. Wenger (wjanach@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: **Erweiterung Diplomarbeit p-Booster-Druckspeicher für turbolader-Dynamik** (SB)
- [24] R. Bunge (rainer.bunge@hsr.ch), HSR, Rapperswil: **Stickoxidreduktion bei mobilen Dieselmotoren**
- [25] J. P. Corbat (jpierre.corbat@eif.ch), EIF, Freiburg: **Motorenprüfstand für Messungen an Partikelfiltern am Liebherr Dieselmotor** (SB)
- [26] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Strategiepapier Verbrennungsforschung** (SB)
- [27] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB)
- [28] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**
- [29] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**
- [30] J. Czerwinski (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch) HTA, Biel: **Grundlagen der H₂-Reformat-zumischung am Ottomotor**
- [31] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**
- [32] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Advanced Zero Emission Power (AZEP)**, (First Year Scientific Report of PSI in the EU-Projekt AZEP), (ENK6-CT-2001-0051).
- [33] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **TARGET: The Influence of Tar Composition and Concentration on Fouling, Emission and Efficiency of Micro and Small scale Gas Turbines** (ENK5-2000-00313).

- [34] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **AD700-2: Development of an Advanced(700°C) PowerPaint II** (ENK6-CT-2001-00xy)
- [35] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **CAME-GT: Thematic Network for Cleaner and More Efficient Gas Turbines** (ENK5-CT-2001-2006)

Referenzen

- [36] T. Koch, **Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung in einem direkteingespritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14937, 2002.
- [37] K. Schänzlin, **Experimenteller Beitrag zur Charakterisierung der Gemischbildung und Verbrennung in einem direkteingespritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14939, 2002.
- [38] L. Demiraydin, **Numerical Investigation of Turbulent Nonpremixed Methane-Air Flames**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14947, 2002.
- [39] N. Tylli, **Induced global unsteadiness and sidewall effects in a backward-facing step flow: Experiments and numerical simulation**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14913, 2002.
- [40] K. Herrmann, **Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in turbulenten Vormischflammen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14952, 2002.
- [41] S. Kunte, **Untersuchungen zum Einfluss von Brennstoffstruktur und -sauerstoffgehalt auf die Russbildung und -oxidation in laminaren Diffusionsflammen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 15003, 2003.
- [42] B. Schneider, **Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck**, Dissertation ETH Zürich, 2003.
- [43] Ch. Appel, **Katalytisch stabilisierte Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen über Platin in laminaren und turbulenten Kanalströmungen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14642, 2002.
- [44] C. Schär, **Control of the Urea SCR Catalytic Converter System for a Heavy Duty Mobile Diesel Application**, Dissertation ETH Zürich Nr. 15004, 2003.
- [45] G. Madia, **Measures to Enhance the NOx Conversion in Urea-SCR Systems for Automotive applications**, Dissertation ETH Zürich, 2002.
- [46] Ch. Del Taglia, **Numerical Investigation of the Non-Reacting Unsteady Flow behind a Disk-Stabilized Burner with Large Blockage**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14875, 2002.
- [47] M. Koebel et. al., **Recent Advances in the Development of Urea-SCR for Automotive applications**, SAE Transactions – Journal of Fuel&Lubricants 2001-01-3625.
- [48] W. E. Janach et. al., **Boosting of Turbocharger Dynamics: Simulation and Comparison of Different Solutions**, SAE 2002 03P-41.
- [49] C. E. Frouzakis et. al., **Transient Phenomena During Diffusion/Edge Flame Transitions in an Opposed-Jet Hydrogen/air Burner**, Proc. Comb. Inst., volume 29, 2002.
- [50] C. E. Frouzakis et. al., **From Diffusion to Premixed Flames in an H₂/Air Opposed-Jet Burner: The Role of Edge Flames**, Combustion and Flame, volume 130:171-184 (2002).
- [51] G. B. Dummond, Ed., **XXIII Task-Leaders-Meeting**, Proc. IEA-Conf. , Trondheim, Juni 2002.
- [52] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 6th ETH-Conference on Nanoparticle-Measurements, October 2002.
- [53] A. Hintermann, **Forschungsprogramm Feuerung&Verbrennung 2000-2003**.
- [54] BFE-**Internetseite des Forschungsprogramms** <http://www.feuerung-verbrennung.ch/fe>, Rubrik *Berichte*